

DESAIN FONDASI *SUCTION PILE* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

STUDI KASUS DI LEPAS PANTAI UTARA JAWA

M. Abby Primananda¹ dan Dr. Ir. Hendriyawan, MT²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung 40123

¹abbyprim@gmail.com dan ²hendriyawan@ocean.itb.ac.id

ABSTRAK

Sebagai sebuah fondasi untuk anjungan lepas pantai, penggunaan *suction pile* tentunya harus melalui proses perancangan desain dan penyelidikan tanah yang sebaik mungkin, agar fondasi stabil dan tanah tidak mengalami keruntuhan. Dan untuk mencapai kondisi yang stabil, perlu diketahui kapasitas daya dukung dari fondasi yang akan digunakan, yaitu harus mampu menahan beban yang akan diaplikasikan pada fondasi. Oleh karena itu dalam studi ini akan dilakukan analisis daya dukung dari fondasi *suction pile*, melalui proses desain terhadap parameter dari fondasi *suction pile*, yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS 2D dan mengacu pada hasil model dari PLAXIS 3D v16.

Pemodelan dilakukan menggunakan data lapangan, yang bersumber dari lokasi studi yaitu di kawasan Lepas Pantai Utara Jawa dengan ukuran diameter *suction pile* yaitu sebesar 5 m dan panjang *pile* 7.5 m. Proses desain terhadap parameter dari fondasi *suction pile* dilakukan pada model 2D *plane strain*, yaitu pada parameter kekakuan aksial (EA) dan kekakuan lendutan (EI), yang dimaksudkan agar hasil pemodelannya dapat mendekati hasil model dari 3D.

Dari hasil pemodelan yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa untuk memperoleh hasil 2D *plane strain* yang mendekati hasil model 3D, dibutuhkan faktor simplifikasi sebesar 30 untuk parameter pelat dari fondasi *suction pile* yaitu pada parameter kekakuan aksial (EA) dan kekakuan lendutan (EI).

Kata Kunci : Anjungan lepas pantai, fondasi, *suction pile*, metode elemen hingga, PLAXIS

PENDAHULUAN

Meningkatnya kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas dikawasan lepas pantai, mendorong pertumbuhan terhadap pembangunan anjungan lepas pantai. Seperti sebuah struktur pada umumnya, anjungan lepas pantai memerlukan fondasi untuk menopang struktur bangunan dan beban yang bekerja diatasnya. Oleh karena itu, perencanaan fondasi merupakan salah satu aspek penting yang harus diperhitungkan dalam perancangan struktur bangunan lepas pantai. Dan seiring berjalannya waktu, teknologi fondasi untuk anjungan lepas pantai mengalami beberapa kemajuan. Salah satu teknologi fondasi yang terbilang baru dalam hal ini adalah *Suction Pile*. *Suction pile* digunakan pertama kali pada tahun 1981 di *Gorm Field, North Sea* sebagai jangkar untuk struktur terapung milik perusahaan minyak *Shell*.

Keunggulan *suction pile* dibandingkan dengan jenis fondasi lain yaitu jenis pondasi ini dapat berfungsi dengan sangat baik pada kondisi tanah *soft clay* atau sedimen lain dengan kondisi tegangan yang rendah. Dimana pada kondisi ini dan di banyak kasus, proses instalasi dari *suction pile* lebih mudah daripada proses instalasi *pile* yang membutuhkan *hammer* untuk proses pemancangannya (Tassoulas et al., 2005). Selain itu, *suction pile* juga sering digunakan sebagai sistem jangkar bagi struktur terapung karena karena jenis fondasi ini dapat menahan baik beban axial maupun lateral. Salah satu penggunaan *suction pile* yang terkenal yaitu pada *platform* Diana di *Gulf of Mexico* pada tahun 1999, dimana penggunaan jenis pondasi ini menjadi rekor dunia saat itu karena berhasil digunakan pada kedalaman sekitar 1500 m pada tanah *soft clay* dengan ukuran tinggi *pile* 30 m dan diameter 6.5 m. Sejak saat itu, statistik ditahun 2002 mencatat sebanyak 485 *suction pile* telah digunakan dilebih dari 50 lokasi diseluruh dunia seperti *North Sea*, *Gulf of Mexico*, Laut Cina Selatan, Laut Timor, dll (Roni Sahroni T, 2015).

Sebagai sebuah fondasi untuk anjungan lepas pantai, penggunaan *suction pile* tentunya harus melalui proses perancangan desain dan penyelidikan tanah yang sebaik mungkin, agar fondasi stabil dan tanah tidak mengalami keruntuhan. Dan untuk mencapai kondisi yang stabil, perlu diketahui kapasitas daya dukung dari fondasi yang akan digunakan, yaitu harus mampu menahan beban yang akan diaplikasikan pada fondasi. Oleh karena itu dalam laporan tugas akhir ini akan dilakukan analisis daya dukung dari fondasi *suction pile*, melalui proses desain terhadap parameter dari fondasi *suction pile*, yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS 2D yang mengacu pada hasil model dari PLAXIS 3D v16.

Proses desain terhadap parameter dari fondasi *suction pile* dilakukan pada model 2D *plane strain*, yaitu pada parameter kekakuan aksial (EA) dan kekakuan lendutan (EI), yang dimaksudkan agar hasil pemodelannya dapat mendekati hasil model dari 3D. Untuk data lapangan, dilakukan dengan yang bersumber dari lokasi studi yaitu di kawasan Lepas Pantai Utara Jawa. Dan untuk ilustrasi lokasi studi dapat dilihat pada **Gambar 1**.

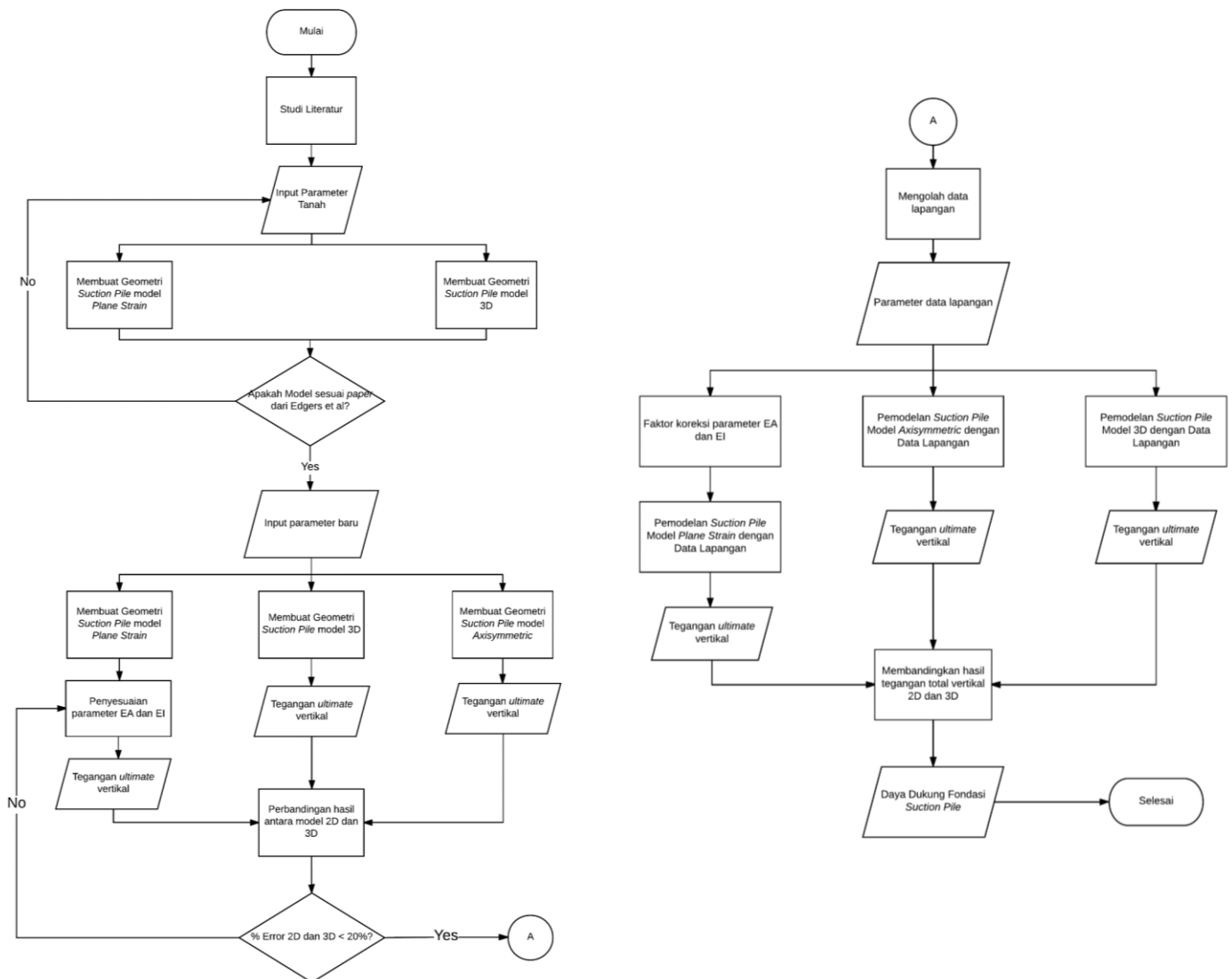


Gambar 1 Lokasi studi dari rencana instalasi suction pile

(Sumber : *Google Earth*)

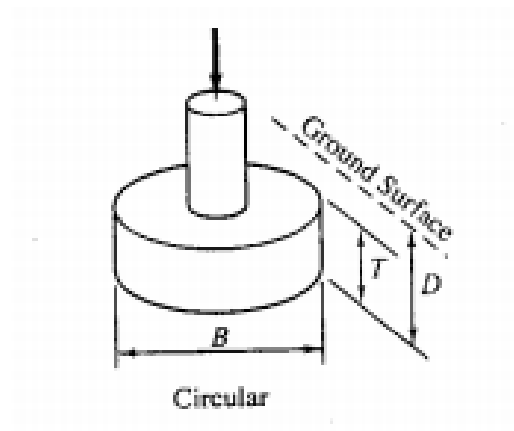
METODOLOGI DAN TEORI

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Metodologi pengerjaan tugas akhir

Suction pile adalah jenis fondasi yang termasuk kedalam jenis fondasi dangkal, karena rasio antara panjang fondasi (D) dengan diameter fondasi (B) yaitu kurang dari 3, $D/B \leq 3$ (Coduto, 2001). Untuk ilustrasi dari parameter D dan B dari fondasi dapat dilihat pada **Gambar 3**.



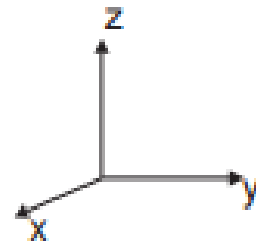
Gambar 3 Ilustrasi D dan B pada jenis fondasi dangkal

(Sumber : Coduto, 2001)

Proses desain *suction pile* yang dilakukan dalam tugas akhir ini dilakukan terhadap parameter dari *suction pile* pada tahap pemodelan yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS 2D dan 3D. Pemodelan pada PLAXIS yang dilakukan terdiri dari 3 jenis model yaitu 3D, 2D *Axisymmetric*, dan 2D *Plane Strain*.

I. Model 3D

PLAXIS 3D adalah perangkat lunak elemen hingga yang khusus untuk memodelkan bentuk tiga dimensi yang dapat menampilkan bentuk deformasi, stabilitas, maupun analisis aliran untuk berbagai jenis geoteknik terapan. Program PLAXIS 3D menggunakan tampilan grafis yang nyaman untuk digunakan sehingga membuat pengguna dapat dengan cepat membuat geometri model dan membuat ukuran elemen hingga. model sementara untuk Y negatif masih dapat digunakan.

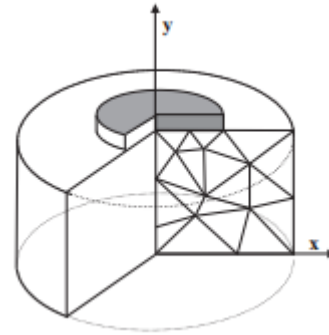


Gambar 4 Koordinat global dari PLAXIS 3D

(Sumber : PLAXIS 3D Reference, 2016)

II. Model *Axisymmetric*

Axisymmetric adalah jenis pemodelan yang lazimnya digunakan untuk struktur berbentuk lingkaran (*circular structures*) dengan pengaruh pemodelan yaitu sesuai dengan radius (jari-jari) yang dibuat pada geometri model. Pada model ini deformasi dan kondisi tegangan yang terjadi juga dianggap seragam disepanjang radiusnya. Sebagai catatan, untuk koordinat negatif dari X tidak dapat digunakan untuk membuat geometri model sementara untuk Y negatif masih dapat digunakan.

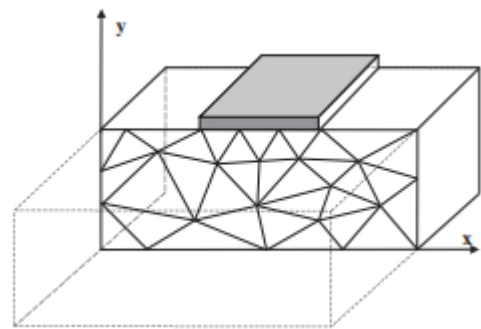


Gambar 5 Ilustrasi pemodelan *Axisymmetric*

(Sumber : PLAXIS 2D Reference, 2016)

III. Model *Plane Strain*

Plane strain adalah jenis pemodelan yang digunakan untuk model geometri dengan penampang melintang yang kurang lebih seragam, dengan kondisi tegangan dan kondisi pembebanan yang cukup panjang dalam arah tegak lurus terhadap penampang tersebut (arah sumbu Z). Selain itu, pada model ini perpindahan (deformasi) dan regangan dalam arah Z pada model ini diasumsikan tidak terjadi atau bernilai 0.



Gambar 6 Ilustrasi pemodelan *Plane Strain*

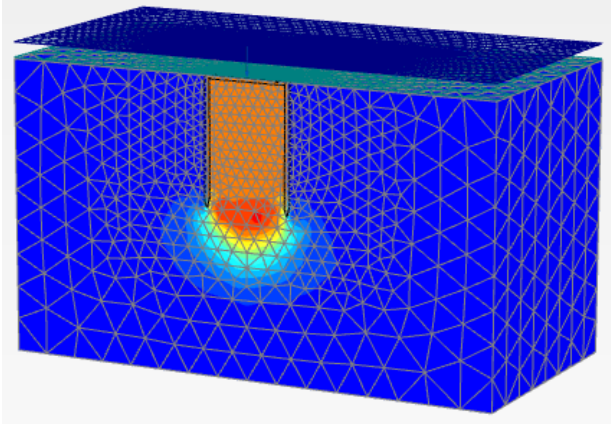
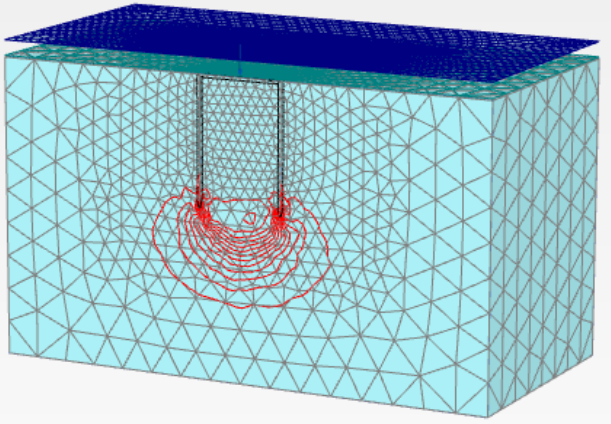
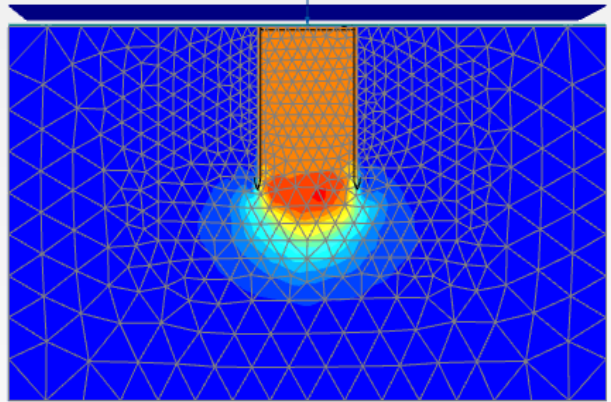
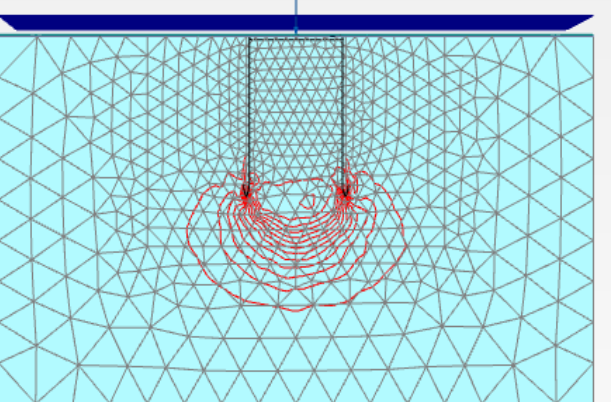
(Sumber : PLAXIS 2D Reference, 2016)

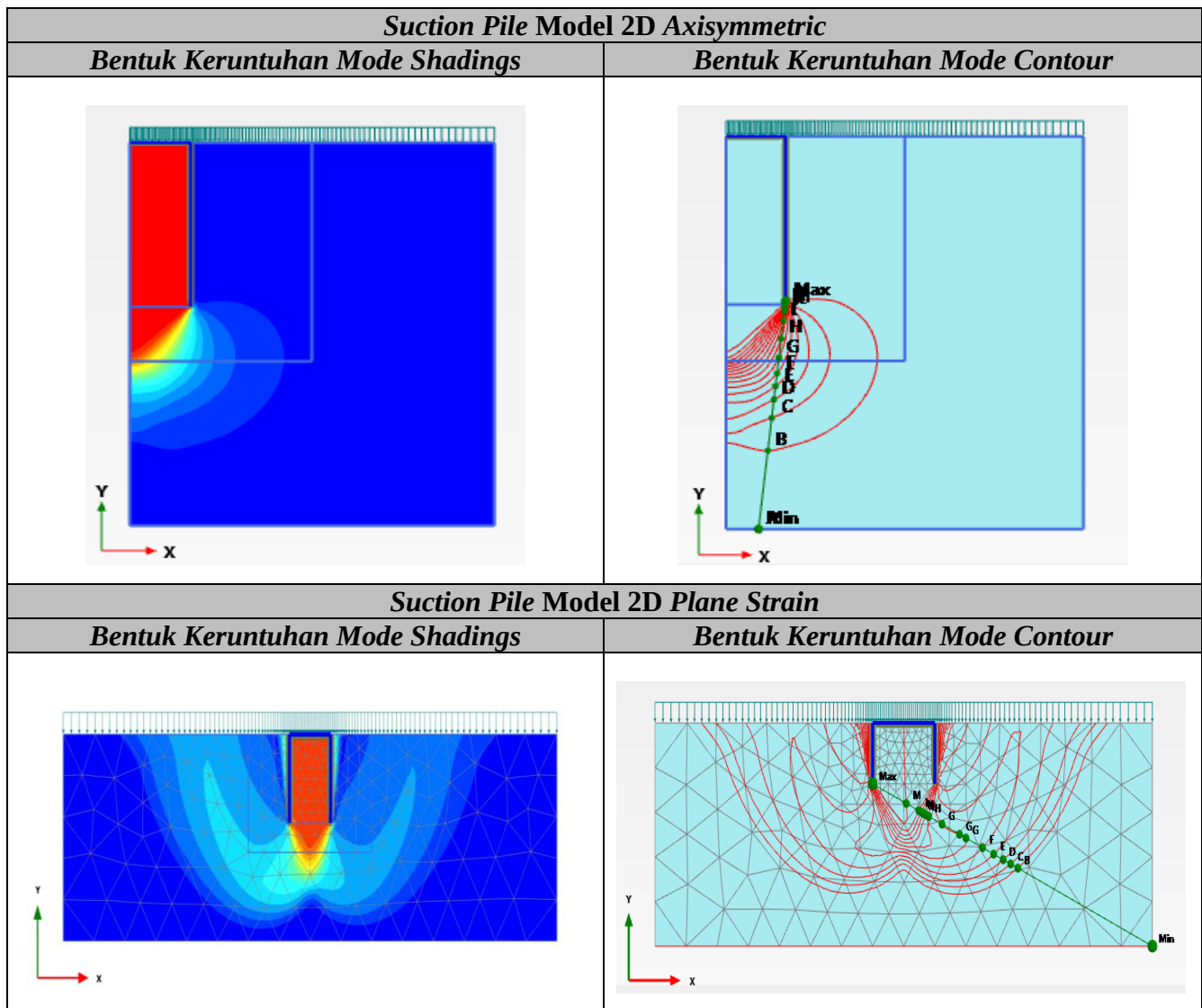
Model yang dijadikan acuan adalah model 3D, dan desain terhadap parameter dilakukan pada model 2D *plane strain* agar hasil model mendekati hasil 3D.

HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan hasil perhitungan elemen hingga dari software PLAXIS 2D dan 3D, akan menghasilkan beberapa parameter. Dan dalam hal ini, parameter yang akan dibandingkan mulai dari model *axisymmetric*, *plane strain*, dan 3D adalah daya dukung *ultimate* yang terjadi pada fondasi *suction pile* dan juga akan dilihat mengenai bentuk keruntuhan tanah yang terjadi. Terkait bentuk keruntuhan tanah yaitu akan ditinjau dalam dua mode ; mode *shadings* dan *contour*. Hal ini karena kedua mode tersebut dapat mengilustrasikan secara lebih jelas dalam menjelaskan keruntuhan tanah yang terjadi. Berikut adalah hasil dari pemodelan yang telah dilakukan.

1. Validasi Beban Aksial

Suction Pile Model 3D	
Bentuk Keruntuhan Mode Shadings	Bentuk Keruntuhan Mode Contour
	
Tampak Perspektif	Tampak Perspektif
	
Tampak Depan	Tampak Depan



Dan untuk tabel iterasi terkait faktor simplifikasi terhadap parameter kekakuan aksial (EA) dan kekakuan lendutan (EI) untuk model 2D *plane strain* dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Tegangan Ultimate untuk D = 5 m dan L = 7.5 m

Iterasi	Faktor Simplifikasi	Tegangan <i>Ultimate</i> (kN/m ²)	Error (%)
1	1/30	240.99	24.89
2	1/20	244.70	23.73
3	1/5	266.06	17.08
4	1	289.25	9.85
5	2.5	297.88	7.16
6	5	302.06	5.86

Iterasi	Faktor Simplifikasi	Tegangan <i>Ultimate</i> (kN/m ²)	Error (%)
7	10	304.52	5.09
8	20	305.71	4.72
9	30	306.13	4.59
10	50	306.45	4.49
11	100	306.68	4.42
12	500	306.87	4.36
13	1000	306.89	4.35

Dari proses iterasi tersebut, dapat dilihat bahwa persentase *error* yang terjadi cenderung konstan pada proses iterasi ke-9 dengan nilai faktor simplifikasi 30. Dari hal ini, dapat diambil poin kesimpulan sementara bahwa angka 30 dapat digunakan sebagai faktor simplifikasi model *suction pile plane strain*.

Dan untuk menguji kesimpulan sementara tersebut, dilakukan pengujian kembali dengan memodelkan *suction pile* pada PLAXIS 2D baik dengan model *axisymmetric* dan *plane strain*, dengan ukuran fondasi yang berbeda. Ukuran *suction pile* yang dimodelkan yaitu sebagai berikut :

Diameter = 2.5 m dan Panjang *suction pile* = 4 m

Tabel 2 Tegangan *Ultimate* untuk D = 2.5 m dan L = 4 m

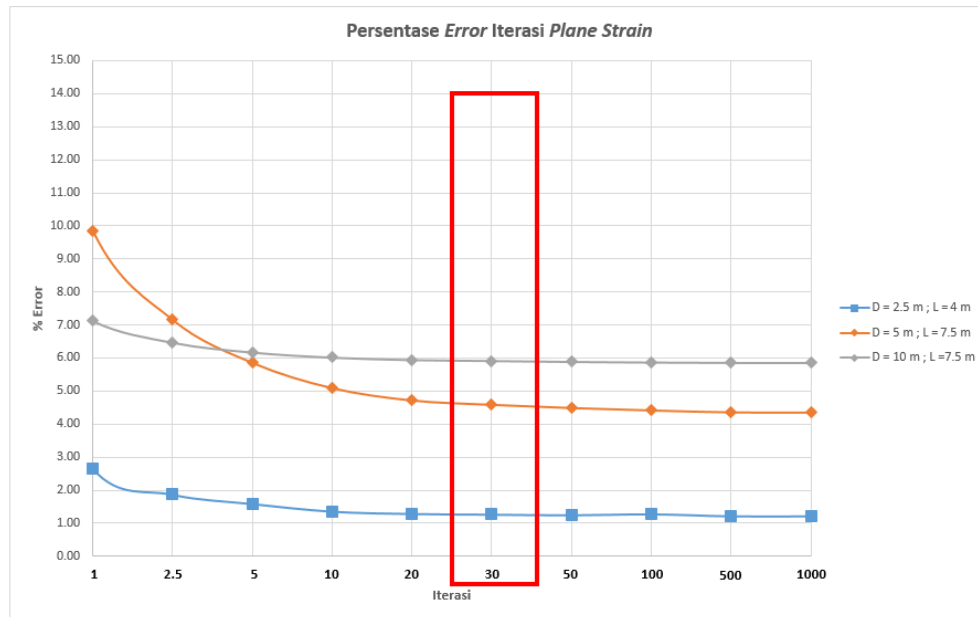
Iterasi	Faktor Simplifikasi	Tegangan <i>Ultimate</i> (kN/m ²)	Error (%)
1	1/30	262.23	19.07
2	1/20	271.37	15.06
3	1/5	290.87	7.34
4	1	304.18	2.65
5	2.5	306.50	1.87
6	5	307.34	1.59
7	10	308.03	1.36
8	20	308.24	1.29
9	30	308.31	1.27
10	50	308.37	1.25
11	100	308.29	1.28
12	500	308.46	1.22
13	1000	308.46	1.22

Diameter = 10 m dan Panjang *suction pile* = 7.5 m

Tabel 3 Tegangan *Ultimate* untuk D = 10 m dan L = 7.5 m

Iterasi	Faktor Simplifikasi	Tegangan <i>Ultimate</i> (kN/m ²)	Error (%)
1	1/30	282.62	13.35
2	1/20	282.57	13.36
3	1/5	297.41	8.81
4	1	302.92	7.12
5	2.5	305.07	6.46
6	5	306.03	6.17
7	10	306.53	6.02
8	20	306.77	5.94
9	30	306.86	5.91
10	50	306.95	5.89
11	100	307.01	5.87
12	500	307.05	5.86
13	1000	307.05	5.86

Dan untuk melihat persentase *error* dari ketiga model *suction pile* yang diplotkan dalam sebuah grafik, dapat melihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7 Hasil plot grafik dari tegangan *ultimate suction pile* variasi ukuran

Dari grafik tersebut, didapatkan hasil bahwasannya angka 30 adalah angka maksimum sebagai faktor simplifikasi model *suction pile plane strain* agar dapat mendekati nilai model 3D. Sehingga, dapat dikatakan bahwa dengan faktor simplifikasi 30 model *plane strain* yang dibuat adalah model *plane strain* optimum.

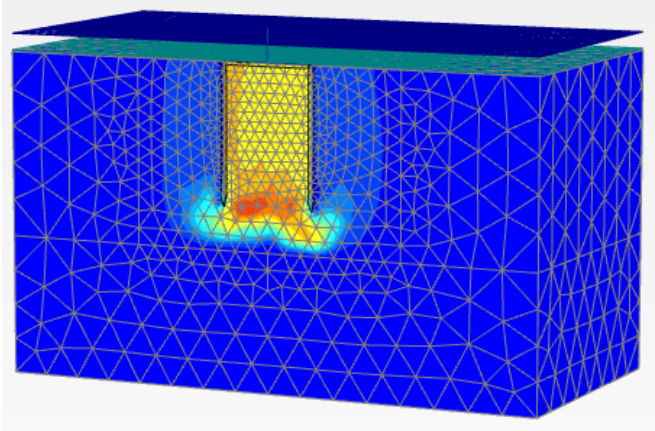
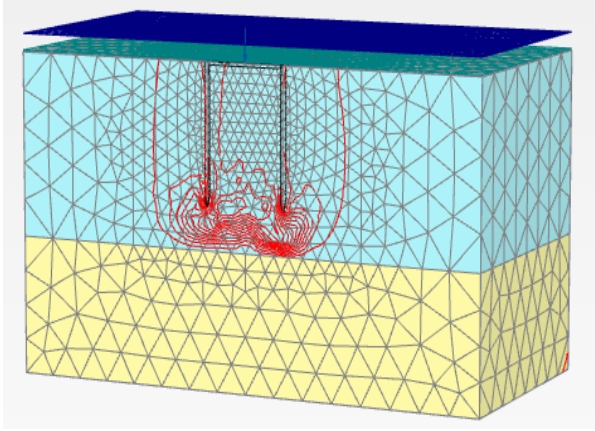
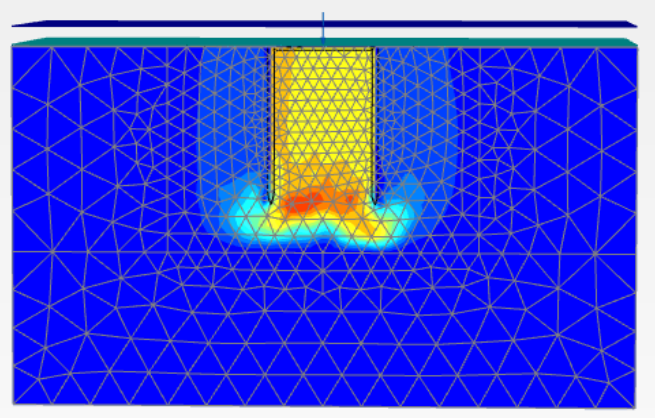
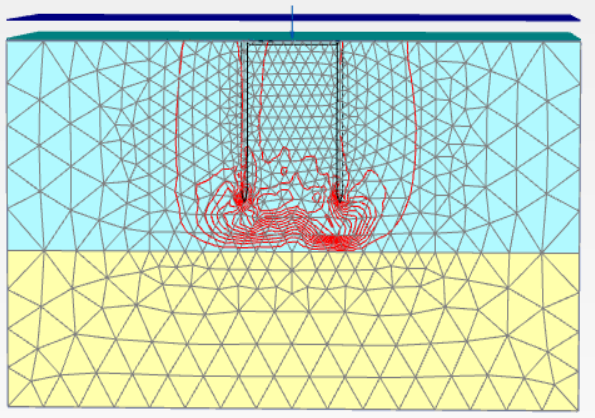
Sehingga jika dirangkum, untuk validasi beban aksial maka kapasitas *ultimate* dari fondasi *suction pile* dengan ukuran diameter 5 m dan panjang *pile* 7.5 m adalah sebagai berikut :

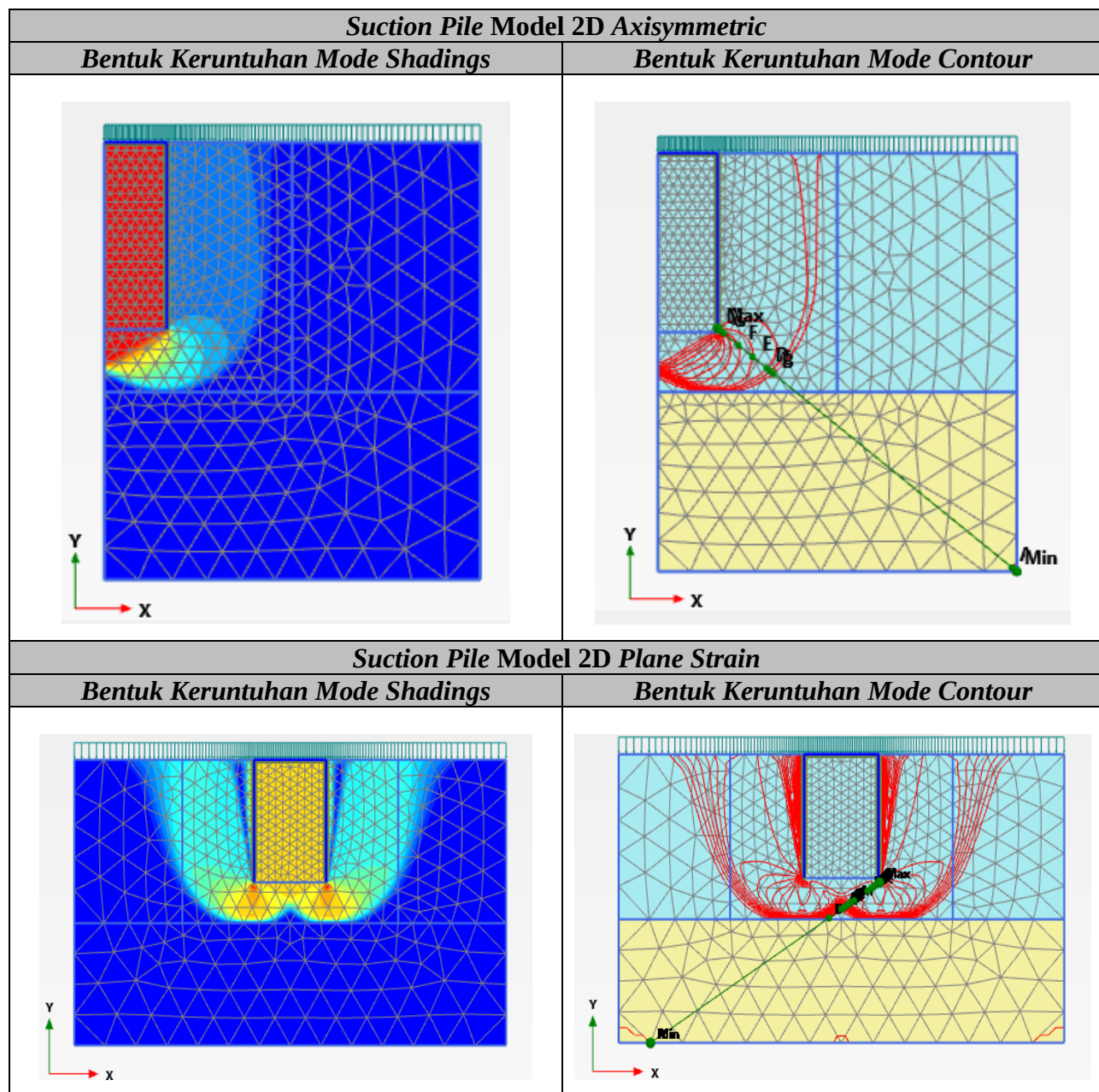
Tabel 4 Hasil Kapasitas *Ultimate* Fondasi *Suction Pile*

Jenis Model	Tegangan <i>Ultimate</i> (kN/m ²)	Daya Dukung <i>Ultimate</i> (kN)
PLAXIS 3D	320	6300
2D <i>Axisymmetric</i>	315	6199
2D <i>Plane Strain</i>	306	6011

2. Hasil Pemodelan *Suction Pile* dengan Data Lapangan

Untuk pemodelan *suction pile* dengan menggunakan data lapangan, ukuran diameter dari fondasi yaitu sebesar 5 m dan panjang 7.5 m.

<i>Suction Pile Model 3D</i>	
<i>Bentuk Keruntuhan Mode Shadings</i>	<i>Bentuk Keruntuhan Mode Contour</i>
 Tampak Perspektif	 Tampak Perspektif
 Tampak Depan	 Tampak Depan



Dan untuk kapasitas *ultimate* dari fondasi *suction pile* dengan data lapangan yaitu dapat dilihat pada

Tabel 5 Hasil Kapasitas *Ultimate* Fondasi *Suction Pile* pada Lokasi Studi

Jenis Model	Tegangan Ultimate (kN/m ²)	Daya Dukung Ultimate (kN)
PLAXIS 3D	110	2165
2D Axisymmetric	106	2096
2D Plane Strain	102	2017

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari proses pengerjaan tugas akhir ini yaitu sebagai berikut :

1. Untuk memodelkan fondasi *suction pile* dapat menggunakan bantuan perangkat lunak PLAXIS pada ketiga jenis modelnya, yaitu model 2D *Axisymmetric*, *Plane Strain*, dan juga 3D, dimana khusus untuk model *plane strain* diperlukan faktor simplifikasi agar dapat mendekati hasil keluaran dari model 3D.
2. Faktor simplifikasi untuk model *suction pile* 2D *plane strain* agar dapat mendekati hasil keluaran dari model *suction pile* 3D yaitu sebesar 30.
3. Persentase *error* yang terjadi antara model *suction pile* 2D dengan model 3D yaitu sebesar 1.6% (2D *Axisymmetric*) dan 4.6% (2D *Plane strain*).
4. Untuk kapasitas tegangan puncak dari fondasi *suction pile* dilokasi studi (q_{ult}) yaitu Lepas Pantai Utara Jawa yaitu sebesar 110 kN/m² (3D), 106 kN/m² (2D *Axisymmetric*), dan 102 kN/m² (2D *Plane Strain*).
5. Persentase *error* yang terjadi antara model *suction pile* 2D dengan model 3D dilokasi studi yaitu sebesar 3.1% (2D *Axisymmetric*) dan 6.8% (2D *Plane strain*).

Adapun saran yang diberikan mengenai pengerjaan tugas akhir ini agar dapat menjadi lebih baik, yaitu sebagai berikut :

1. Melakukan pemodelan *suction pile* dengan beban lateral, agar dapat diperoleh pula faktor simplifikasi nya untuk model 2D *plane strain* akibat pengaruh beban lateral tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- API RP 2A-WSD. 2000. *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*. Washington D.C. : American Petroleum Institute.
- Bowles, J.E. 1996. *Foundation Analysis and Design* 5th Edition. New York : McGraw – Hill.
- Coduto, Donald P. 2001. *Foundation Design Principles and Practices Second Edition*. New Jersey : Prentice Hall.

- Das, Braja M. 2008. *Advanced Soil Mechanics Third Edition*. New York : Taylor and Francis.
- Edgers, L. Lars Andersen dan H. P. Jostad. 2008. *Capacity Analysis of Suction Anchor in Clay by 3D Finite Element*. Medford.
- Geotechnical Engineering Office Hongkong. 2006. *Foundation Design and Construction*. GEO Publication No. 1.
- ISO 19901-4. 2003. *Petroleum and Natural Gas Industries – Specific Requirements for Offshore Structures : Geotechnical and Foundation Design Considerations*. Geneva : International Organization for Standardization.
- Look, Burt. 2007. *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London : Taylor and Francis.
- Niigata Research and Engineering Office for Port and Airport. 2001. *The Development of The Suction Foundation*. Niigata City : Ministry of Land, Infrastructure and Airport.
- Pollestad, Jarand Hornseth. 2015. *Investigation of Suction Anchor Pullout Capacity under Undrained Conditions*. Stavanger : University of Stavanger.
- Plaxis. (2016), *Plaxis 2D Material-Models version 16*. Plaxis bv.
- Plaxis. (2016), *Plaxis 2D Reference Manual version 16*. Plaxis bv.
- Plaxis. (2016), *Plaxis 2D Scientific version 16*. Plaxis bv.
- Plaxis. (2016), *Plaxis 2D Tutorial Manual version 16*. Plaxis bv.
- Plaxis. (2016), *Plaxis 3D Reference Manual version 16*. Plaxis bv.
- Plaxis. (2016), *Plaxis 3D Tutorial Manual version 16*. Plaxis bv.
- Robertson, P. and Mayne, P. (1998). *Geotechnical Site Characterization*. Taylor & Francis.
- Tassoulas, John L. et al. 2005. *Suction Caissons : Finite Element Modeling*. Texas : Department of Civil Engineering The University of Texas.
- Terzaghi, K & Peck. R. B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd edition*. New York : Wiley.
- Zaky, Fauzi Achmad. 2014. *Analisis Stabilitas Fondasi Dangkal dengan Menggunakan Prosedur ISO – 19901 – 4*. Bandung : Institut Teknologi Bandung.